5　光の干渉と空気の屈折率の測定
ーマイケルソン干渉計の原理と実験ー

マイケルソン干渉計を用いて，レーザー光の干渉縞をつくり観察する。また，反射ミラーの一方を移動させて，その間に変化した縞の本数からレーザー光の波長を求める。さらに，真空チャンバーを組み合わせて，空気の屈折率を測定する。

【使用実験機器】マイケルソン干渉計

§１ はじめに

19世紀には，ほとんどの科学者が宇宙は「光を放つエーテル」という物質で満たされていると信じていた。1887年，アルバート・マイケルソンとエドワード・モーリーの２人は，地球がエーテルの中をどれだけの速さで進んでいるかを，干渉を利用してつきとめようとした。

この目的のためには，光の伝わる速さを，地球の動いている方向と，その逆方向とで測ればよいわけだが，光速が地球の動きに比べ極端に大きいので，直接測ることはむずかしい。そこで，光源からの光線を半透過型の鏡で２つに分割し，互いに直角に進ませる。往復する時間が違えば，これに相当する光路差による光の干渉が見られるはずである。しかし，往復距離を完全に一致させることは実現が困難であるので，この装置を90°回転させて干渉縞の移動を見ることにした。ところが，実験結果は，装置その他いろいろな誤差を考えに入れても，有為な干渉縞の移動は観測できなかった。もともと，エーテルに対する地球の速度の方向が，あらかじめ知られているわけではないから，いろいろな季節に方向を変えて繰り返し実験しても，予期された干渉縞の移動は観測されなかった。

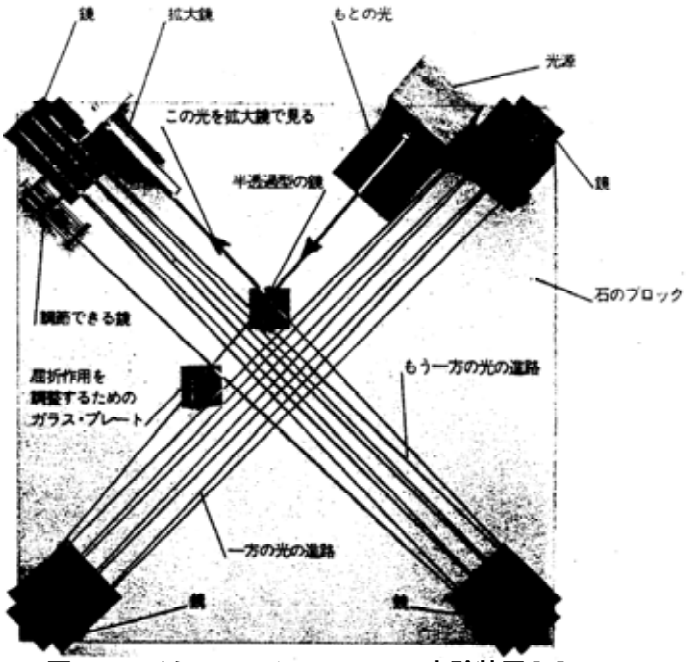


図１　マイケルソンとモーリーの実験装置 [5]

この結果を説明するために，いろいろな試みがなされたが，決定的な結論を与えたのは，1905年のアルバート・アインシュタインの特殊相対性理論である。アインシュタインの考えは，「すべての運動は相対的であり絶対の運動はあり得ない。なぜなら運動の規準になる絶対的に静止したものはどこにもないのだから。」と，エーテル説に終止符を打った。

ここでは，この実験の原理に基づくマイケルソン干渉計を使って，光の干渉現象を観測し，

レーザー光の波長測定（実験Ⅰ）と空気の屈折率の測定（実験Ⅱ）を行う。

§２ 実験Ⅰ：レーザー光の波長測定

１ 解説

(1)光の干渉と波長測定の原理

レーザー光を顕微鏡用対物レンズで広げ，ビームスピリッターに入射する。ビーム１は，ビームスピリッターを透過した後，表面鏡Ｓ１で反射されて元きた道を戻り，再びビームスピリッターに入射し，そこで反射してスクリーンに到達する。一方，ビーム２はビームスピリッターで反射し，表面鏡Ｓ２で反射された後，ビームスピリッターを透過してスクリーンに到達する。同じ位置に到達したビームは，リング状の干渉縞を生じる。

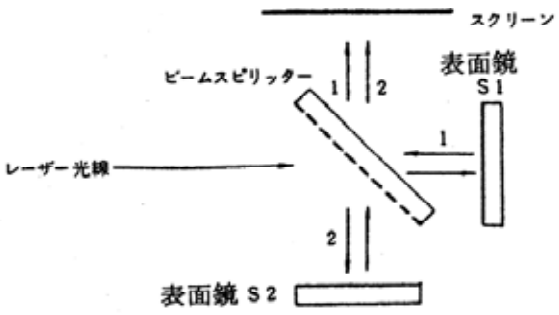


図２　原理図

この干渉リングは，２つのビームの光路長の差に相当する厚さの空気層によって生じるものと考えられる。よって，光源の波長λに対し，光路差がλ/２変化するごとに明暗が反転する。

ここで，表面鏡Ｓ１を光軸にそって⊿Ｓ変位させたとき，明暗の反転回数（明→暗→明または 暗→明→暗 を１回と数える）がｎ回であったとすると，光路長の変化は２⊿Ｓであるので，光源の波長λと⊿Ｓ，ｎの間には次式の関係が成り立つ。

$$n\lambda = 2\Delta S \qquad \cdots(1)$$

従って，光源の波長λは

$$\lambda = \frac{2\Delta S}{n} \qquad \cdots(2)$$

と求められる。

(2)マイケルソン干渉計

【マイケルソン干渉計の主要部の名称】

①干渉計ベース
②固定ミラーステージ
③ハーフミラーステージ
④微動ミラーステージ
⑤固定ミラー
⑥微動ミラー
⑦Ｘ調整ネジ
⑧Ｙ調整ネジ
⑨ハーフミラー
⑩微動装置
⑪マイクロメーター

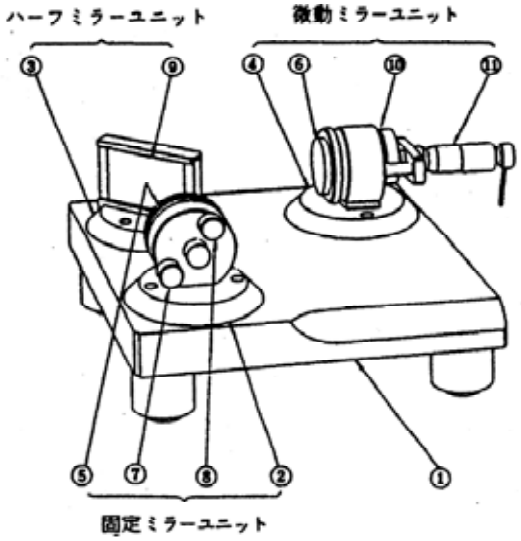


図３ マイケルソン干渉計 外観図

※マイクロメーター⑪は，時計方向に回転することにより，微動メーターが前進する。
１回転で50μm移動し，バーニアによって0.1μmのオーダーまでの読み取りができる。

2 実験

(1)実験装置及び器具

・マイケルソン干渉計　MJ-15
・レーザー装置　GLG-5014
・顕微鏡用対物レンズ×10または×20
・スクリーン（適当な白い平面）
・干渉計用光検出器　LX-10
・センサ保持のための適当なクランプと支持台
・電子計数装置　NX-10

(2)実験装置の組立と調整

① 図４のように装置を配置し，配線する。
※調整では，はじめ，干渉計用光検出器に接続された光センサ部分にスクリーンを置く。

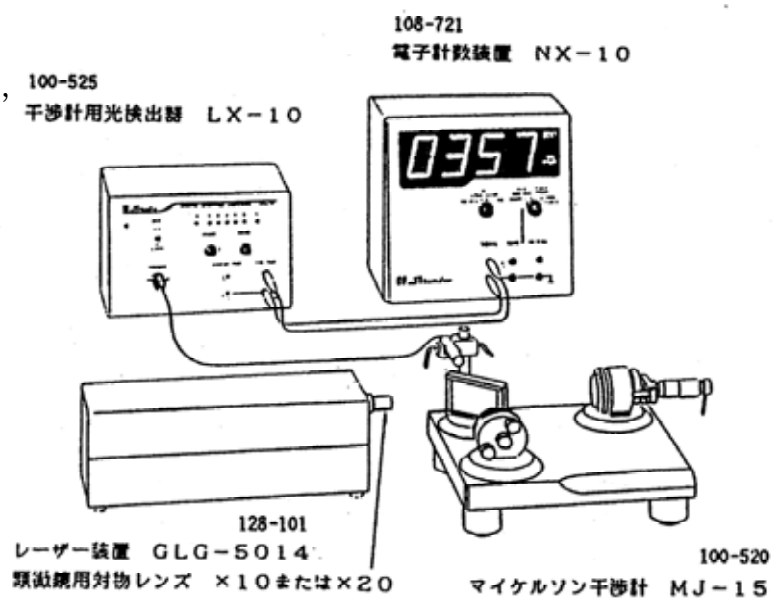


図４　装置の配置

② レーザー装置から顕微鏡用対物レンズを取り外した状態で，固定ミラーを紙などで隠し，微動ミラー側のビームだけが見えるようにする。
③ 微動ミラー中心部にビームを当て，反射してきたビームがレーザー装置の出力窓に戻るように，レーザー装置の位置を高さとともに決める。このビームの半分はハーフミラーで反射されてスクリーンにあたるので，ビームのスポットが中心部にくるようにスクリーンの位置を調整する。このスポットの位置は何かで目印を付けておくとよい。
④ 固定ミラーを隠していた紙などをはずして，スクリーンに固定ミラー側のビームによるスポットが現れるようにする。固定ミラーのＸ調整ネジ・Ｙ調整ネジを回転し微動ミラー側のスポットと一致させる。
⑤ 顕微鏡用対物レンズをレーザー装置に取り付け，拡散光でスクリーン上に干渉リングを作る。このとき，拡散光の方向が少し傾くことがあるので，拡散光の光軸が微動ミラーの中心部になるようにレーザー装置の位置を調節する。スクリーン上の干渉リングの中心を前述の目印の位置になるように，固定ミラーのＸ調整ネジ・Ｙ調整ネジを回転する。

⑥ マイクロメーターをゆっくり回転させ，リングの中心が動かなければ光軸の調整は完了する。

⑦ スクリーンの干渉リングの所に，スクリーンを除きクランプと支持台で干渉計用光検出器のセンサをセットする。干渉リング中心部の明暗変化の面積が大きい部分に，センサの受光素子がくるようにする。必要な光源以外の照明を消す。

【注意】室内の蛍光灯は使用できない。

⑧ マイクロメーターを操作して干渉リングの中心に最も暗い部分がくるようにする。ゲイン調整つまみを右寄りの位置にし，レベル調整つまみを左端からゆっくり右方向へ回転させＬＥＤレベルメーター（◁マーク）が消えた直後で止める。

【注意】GREENが点灯しない位置にすること。

⑨ つぎに，干渉リングの中心に最も明るい部分がくるようにし，ゲイン調整つまみを右端からゆっくり左方向へ回転させ右のＬED(▷マーク）が消えた直後で止める。

【注意】１から５のGREENが点灯している状態にする。

(3)実験の方法

① まず，マイクロメーターを反時計方向に回転させ，微動ミラーを測定出来るだけ後退させる。機構部分の遊びなどの影響をなくすため，マイクロメーターを時計方向に，約１回転まわして，初めの位置S_0の目盛りを読み取る。

② 電子計数装置を０にし，マイクロメーターを時計方向へ回転させ，微動ミラーを前進させながら 6000回 の位置S_1の目盛りを読み取る。

③ ２点S_0,S_1の読み取り値から，　$S_0-S_1=\Delta S$　として波長λを(2)式より求める。

３ 実験結果と分析

測定例：光源He－Neレーザー （波長 632.8 nm）

①　$S_0=$ 2. 0010[mm]

$S_1=$ 0. 1023[mm]

$\Delta S=S_0-S_1=$ 1.8987[mm]

$n=6000$

これより　$\lambda=\dfrac{2\Delta S}{n}=$ 632.9[nm]

②　$S_0=$ 2. 0742[mm]

$S_1=$ 0. 1747[mm]

$\Delta S=S_0-S_1=$ 1.8995[mm]

$n=6000$

これより　$\lambda=\dfrac{2\Delta S}{n}=$ 633.2[nm]

※①②の平均値は，633.1 nm となり，誤差は

(633.1－632.8)／632.8×100 ＝ 0.05[%]

【備考】《干渉縞の反転回数ｎと波長の測定》

① データの取り方を 300回 とし，繰り返し実験する。

表１　ｎ＝ 300 の測定例

n＝300	データ１	データ２	データ３	データ４	データ５	平　均
S_0[㎜]	1.8758	1.7758	1.6757	1.5760	1.4750	
S_1[㎜]	1.7818	1.6815	1.5805	1.4814	1.3799	
λ [nm]	626.7	628.7	634.7	630.7	634.0	631.0

※平均値は 631.0 ㎚ で，誤差は

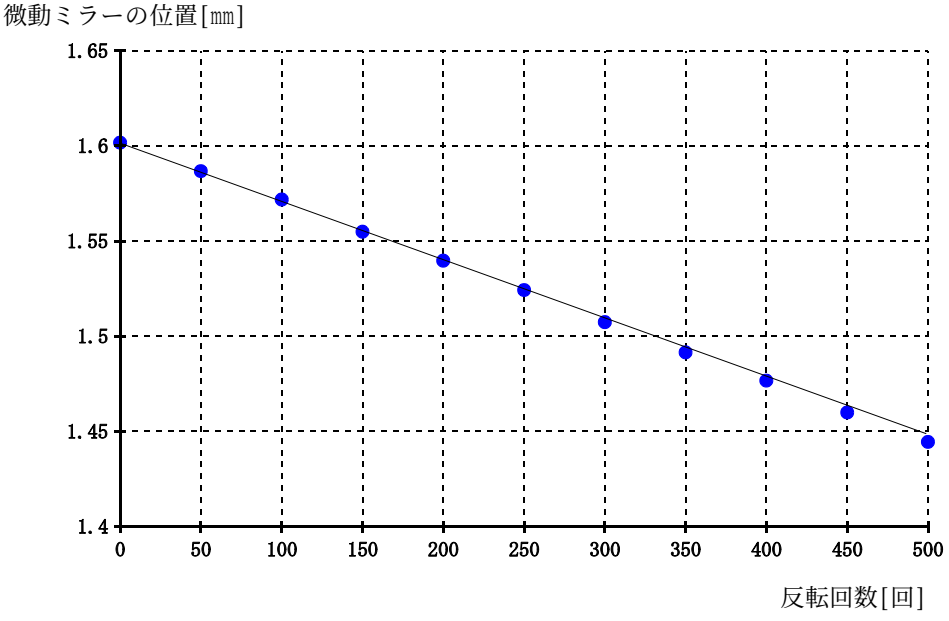
（631.0－632.8）／632.8×100＝－0.28[％]

と，少し大きくなる。

② データの取り方を50回ごとに500回まで合計11ポイントとり，最小２乗法で一次式に近似し，その傾きから求める。

表２　ｎ＝ 50～500 の測定例

ｎ：位置	データ１	データ２	データ３	データ４	データ５	平　均
0 [㎜]	1.9747	1.7757	1.6017	1.4255	1.2510	
50	1.9574	1.7600	1.5867	1.4085	1.2358	
100	1.9426	1.7436	1.5718	1.3928	1.2209	
150	1.9279	1.7285	1.5549	1.3776	1.2045	
200	1.9114	1.7127	1.5396	1.3607	1.1894	
250	1.8953	1.6966	1.5242	1.3448	1.1736	
300	1.8805	1.6816	1.5073	1.3294	1.1579	
350	1.8641	1.6652	1.4915	1.3132	1.1423	
400	1.8476	1.6493	1.4766	1.2976	1.1272	
450	1.8333	1.6347	1.4599	1.2822	1.1109	
500	1.8173	1.6185	1.4444	1.2663	1.0950	
近似値nm	628	628	632	636	624	629.6



$y = -0.000316x + 1.6025$

$0.000316 \times 2 \rightarrow 632$ ㎚

図５　一次近似のグラフ（データ３の結果）

※誤差は，(629.6－632.8)/632.8×100＝－0.51[%]
　と最も大きくなった。

③ 干渉縞が安定して変化しない時間帯を利用しないと，セットしたままで触らなくても明暗が変化する。その結果，すばやく 6000回 ぐらいを実験した方が精度は良いと考えられる。

§３ 実験Ⅱ：空気の屈折率の測定

１ 解説

(1)空気の屈折率の測定原理

マイケルソン干渉計の一方の光路に真空チャンバーを取り付けることにより，ハーフミラーで分離された一方のビームが２度真空チャンバーを通り，真空状態と空気中とでは光の速度が異なることから干渉縞の反転が生じる。

チャンバーの長さをＬ，屈折率をｎとすると，光路長ｄは，

$$d = 2nL \qquad \cdots(3)$$

と表せる。また，チャンバーを真空状態にし，ゆっくり空気を満たしていけば干渉縞の反転回数から光路差が測定できる。

真空の屈折率ｎは１であり，空気の屈折率をn_1とすると，光路差⊿ｄは，

$$\Delta d = d_1 - d = 2n_1L - 2L \qquad \cdots(4)$$

となる。一方，干渉縞の反転回数をm回とすると，光路差⊿ｄは，

$$\Delta d = m \cdot \lambda \qquad \cdots(5)$$

となるので，(4)(5)式より，空気の屈折率n_1は，

$$n_1 = 1 + m \cdot \frac{\lambda}{2L} \qquad \cdots(6)$$

と求められる。

(2)真空チャンバー装置

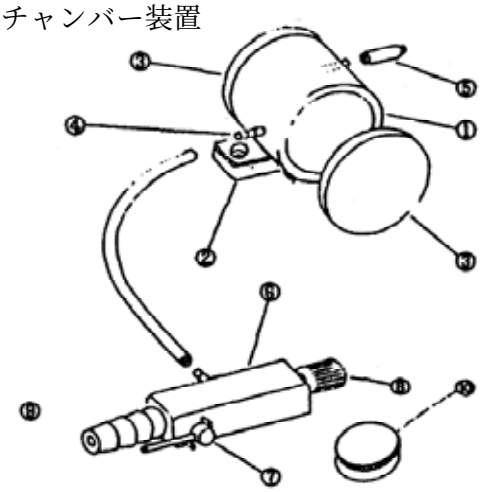


図６　装置の構成

①チャンバー
　（内径 40㎜,真空部長さ 40㎜）
②取り付け台
③ガラス板
④ノズル
⑤補助ノズル
⑥中間バルブ
⑦コック
⑧エア調節ねじ
⑨排気ノズル
⑩真空グリース

2 実験

(1)実験装置および器具

・マイケルソン干渉計　MJ-15
・レーザー装置　GLG-5014
・顕微鏡用対物レンズ×10または×20
・スクリーン（適当な白い平面）
・干渉計用光検出器　LX-10
・センサ保持のための適当なクランプと支持台
・電子計数装置　NX-10
・MJ-15用真空チャンバー
・真空ポンプ

(2)実験装置の組立と調整

・図７のように，マイケルソン干渉計に真空チャンバーを取り付け配置する。取り付けは，取り付け台（図７の②）をねじで止める。
・スクリーンの干渉縞の変化の数は，実験Ⅰと同様，光検出器と計数装置で計数する。

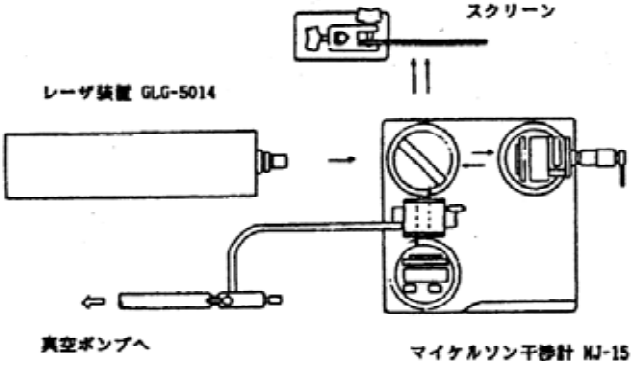


図７　装置の配置

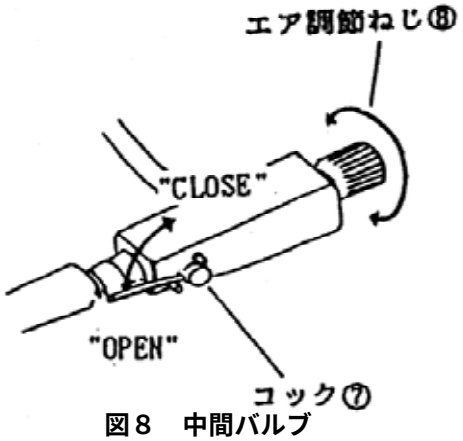


図８　中間バルブ

(3) 実験の方法

① チャンバー①の両側に，ガラス板③を真空グリースでしっかりと密着させる。中間バルブ⑥のコック⑦を"open"にし，エア調節ねじ⑧を締め込んだ状態にして，真空ポンプは止めておく。
② マイケルソン干渉計の干渉縞を光検出器も受光素子部分に作り，計数装置も含めて電源を入れる。
③ 真空ポンプを作動させ，縞模様が変化しなくなるまでチャンバー内の空気を排気する。縞が変化しなくなり，真空ポンプから煙が出るようになったら，コックを閉め真空ポンプを止める。
④ 電子計数装置を０にし，エア調節ねじをゆるめてチャンバー内に空気を入れる。
⑤ 干渉縞が安定したら，電子計数装置の数を読む。

3 実験結果と分析

実験例　光源He－Neレーザー（波長 632.8 nm）

チャンバーの長さＬ＝ 4.000[cm]

1007 hpa 27℃

明暗回数 (回)	頻 度
35	４回
34.5 (*)	４回
34	７回

(*)反転回数は，明→暗→明または暗→明→暗を１回とするので，最後に暗→明で，カウントしないが明らかに変化した時を，0.5回とした。

平均 34.4回

※ (35×4＋34.5×4＋34×7)／15＝34.4

(6)式より

$$n_1 = 1 + 34.4 \times \frac{6.328\times10^{-7}}{2\times4.000\times10^{-2}} = 1.0002721$$

・1013.25hPa　15℃ n_{air} ＝1.000276508 (理科年表・平成９年による)

と比較して，誤差は (2765－2721)/2765×100＝1.6%となった。

【備考】

この実験の場合，エア調節ねじをゆっくりゆるめれば，計数装置を用いなくても明暗回数は十分読み取れる。

【参考文献】

[1]「マイケルソン干渉計」取扱説明書（島津理化器械(株)）
[2]「干渉計用光検出器」取扱説明書（島津理化器械(株)）
[3]「マイケルソン干渉計用真空チャンバー」取扱説明書（島津理化器械(株)）
[4] 国立天文台編「理科年表」（丸善(株)　1997年版）
[5] デイヴィット・バーニー著「ザ・サイエンス・ヴィジュアル２光」（1993,東京書籍）p60～p63